

**В. Р. НИКУЛЬШИН, А. Є ДЕНИСОВА, С. И. МЕЛЬНИК, В. В. ВИСОЧИН, С. І. БУХКАЛО,
А. М. АНДРЮЩЕНКО**

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ОКРЕМИХ СТУПЕНІВ ВИПАРКИ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Для відділення випарки типового цукрового заводу був розроблений метод термoeкономiчної оптимiзацiї окремих її ступенiв. Оскiльки основна частина втрат ексергiї обумовлена теплообмiном при кiнцевiй рiзницi температур, тому в якостi незалежної змiнної при термoeкономiчній оптимiзацiї була обрана величина температурного напору в кожному iз ступенiв з вiдповiдним пошуком своїх мiнiмальних термoeкономiчних витрат. Iснування для кожного ступеня локального мiнiмуму зумовлено тим, що зi зростанням температурного напору збiльшується величина енергетичних витрат (тому що збiльшуються втрати ексергiї) i зменшується величина капiтальних i зв'язаних з ними витрат (тому що зменшується поверхня теплообмiну ступеня), а, отже, їх сума буде мати мiнiмум. Пошук цього мiнiмуму в силу унiмодальностi функцiї термoeкономiчних витрат проводився для кожного iз ступенiв методом Гауса-Зейделя - шляхом послiдовного порiвняння витрат, отриманих на даному кроцi iтерацiї з попереднiми i, якщо знайдене значення менше, то переходять до наступної iтерацiї. Розрахунок закинчується в тому випадку, якщо знайдене значення стає бiльше, нiж значення, що отримане на попередньому кроцi, яке i буде оптимальним. Потiм розраховуються сумарнi термoeкономiчнi витрати, у ступенi. В якостi прикладу застосування розробленого методу були знайденi оптимальнi температурнi напори i локальнi оптимуми рiчних термoeкономiчних витрат для першого ступеня. Знайдене значення температурного напору перевищує вiдповiдне у iснуючiй системi випарки на 2,6 градуса i пiдтримання такого збiльшеного температурного напору у першому ступенi дозволяє зменшити рiчнi витрати в цьому ступенi на 3800 USD. Слiд зазначити, що знайденi значення температурного напору в силу жорсткої прив'язки до технологiчного ланцюжка кожного ступеня вимагають взаємного узгодження, тому що потоки, якi виходять з попереднiх ступенiв, одночасно входять в наступнi, а, отже, температурнi рiвень процесiв в ступенях повинен узгоджено змiнюватися, змiнюючи тим самим величину термoeкономiчних витрат. Крім того, слiд враховувати, що змiна параметрiв потокiв всерединi енерготехнологiчної системи вiддiлення випарки викликає також змiну параметрiв потокiв, якi покидають це вiддiлення.

Ключові слова: багатоступеневі системи, виробництво цукру, термoeкономiка, оптимiзацiя та обчислення.

Вступ.

Виробництво цукру в Україні з рiзновидiв сировини, наприклад, з буряка, є досить енергоємним процесом, а економiчностi його виробництва насамперед визначається: витратами енергоносiїв i їхньою вартiстю; високий ступiнь енергозбереження, наприклад, використання вторинного тепла багато в чому визначають рентабельностi виробництва цукру. Послiдовне чергування нагрiвання i охолодження на всiх етапах виробництва, передбачає широке використання теплообмiнникiв, за оптимальними параметрами технологiчної схеми дозволяє збiльшити продуктивностi i ефективностi рiзновидiв процесiв. Енергоспоживання у цукровому виробництвi, в основному, пов'язують з витратами теплоти на проведення технологiчних процесiв: випаровування води з соку, уварювання утфелю, нагрiв стружки для проведення дифузiйного процесу, багаторазового нагрiвання сокiв в процесi очищення, а також на компенсацiю втрат теплоти.

При цьому питомi енергетичнi витрати на одиницю продукцiї можуть досягати 1500 кДж/кг.

Тому питанням енергозбереження в процесах отримання цукру присвяченi численнi публiкацiї, наприклад вищезначенi [01, с. 390, 750].

Коротко проаналiзуємо найцiкавiшi з них.

Постановка проблеми у загальному виглядi та її зв'язок iз важливими науковими та практичними завданнями.

Як вiдомо з лiтературних джерел, в Україні сахарозу виробляють з цукрових бурякiв з урахуванням вимог стандарту ДСТУ 4623 : 2006 «Цукор бiлий. Технiчнi умови» [02].

Цукор, що мiститься в буряку, добувають екстракцiєю (дифузiєю). Швидкiсть масопередачi прямо пропорцiйна поверхнi контакту фаз i зворотно пропорцiйна шляху (у даному випадку товщинi стружки). Дифузiя сахарози з бурячної тканини може бути описана першим законом Фiка, вiдповiдно до якого кiлькiсть витягнутої речовини (d) – пропорцiйна рiзницi концентрацiй у дотичних рiдинах ($C - c$), часу τ , площi пласту F i зворотно пропорцiйна товщинi шару (x), тобто довжинi шляху дифузiї часток. Отже: $d = D \cdot F \cdot \frac{C - c}{x} \tau$, де $\frac{C - c}{x}$ – градиент концентрацiї, D – приведений коефiцiєнт дифузiї.

Сучаснi заводи, що виробляють цукор, являють собою великi пiдприємства, що переробляють у добу тисячi тон буряка (рис. 1). Технологiчний процес безпосереднього одержання цукру з буряка можна подiлити на етапи: одержання дифузiйного соку, або дифузiя; очищення дифузiйного соку, або просто очищення соку; випарювання соку й кристалiзацiя цукру з випареного соку. Вони добре механiзованi, значна частина операцiй автоматизована. Видалення води iз соку проводять зазвичай вiдповiдно до НТД в два етапи. Спочатку в багатокорпусних випарних апаратах упарюють до вiстуду сухих речовин у сиропi 65 %. При цьому сахароза ще не кристалiзується. Густиий сироп змiшують iз клеровкою (розчином) жовтого цукру, додають 0,1–0,15 % кiзельгуру i направляють на сульфiтацiю (рН=7,5).

© Нікульшин В.Р., Денисова А.С., Мельнік С.І., Бухкало С.І., Андрющенко А.М. 2022

При згущенні соку проходять процеси, що призводять до зміни його хімічного складу: розкладання сахарози і редуруючих сахарів з утворенням органічних кислот; це, в свою чергу, знижує рН соку, підвищує кольоровість сиропу за рахунок протікання процесів карамелізації сахарози.

При цьому відзначають процеси утворення темнобарвлених продуктів взаємодії з аміносполуками, а також підвищується концентрація солей кальцію, які частково випадають у осад. Сік підігрівають, фільтрують, і після цього додаткового

очищення направляють на випарку у вакуум-апарати, де вміст сухих речовин у сиропі підвищується до 92 – 93 %. При такій концентрації починається кристалотворення. Для його прискорення у вакуум-апарат удмухують невелику кількість цукрової пудри, після чого швидко утворюються центри кристалізації.

Приклад схеми випарної станції цукрового заводу (рис. 2) має складові: сік перед подачею в перший корпус підігрівається в декількох парових пластинчастих підігрівниках

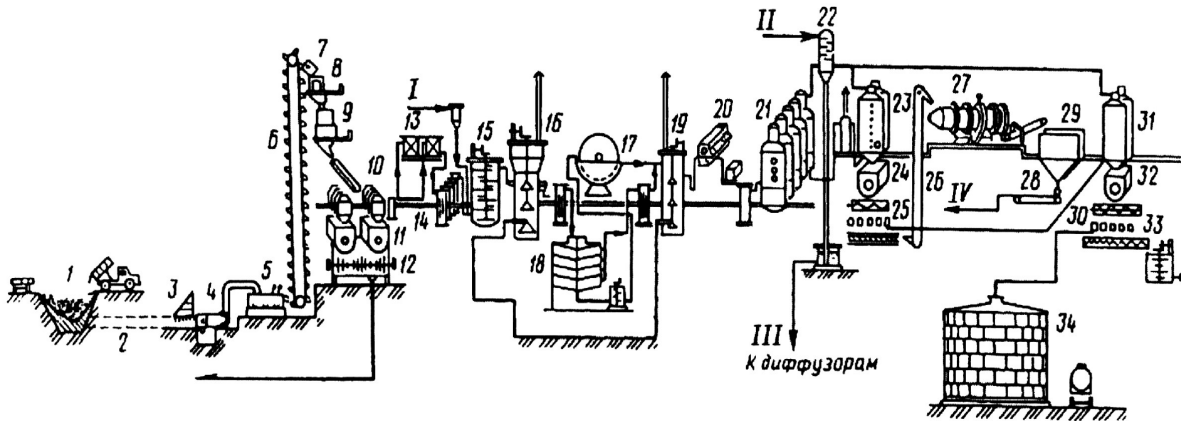


Рис. 1. Технологічна схема за процесами переробки цукрового буряка:

- 1 – бурячна; 2 – гідравлічний транспортер; 3 – соломомуловлювач; 4 – відцентровий насос; 5 – бурякомийна машина; 6 – елеватор; 7 – магнітний уловлювач; 8 – автоматичні ваги; 9 – бурякорізна машина; 10 – дифузійна батарея; 11 – жолоб подачі гніта; 12 – мішалка знецукреної стружки з водою; 13 – резервуари сирого соку; 14 – рішoferи; 15 – дефекатор; 16, 19 – сатуратори; 17 – вакуум-фільтр; 18 – відстійник соку; 20 – фільтр-прес; 21 – випарні апарати; 22 – барометричний конденсатор; 23 – вакуум-апарати; 24 – мішалки; 25 – центрифуги; 26 – елеватор білого цукру; 27 – сушильний барабан; 28 – транспортер подачі цукру в склад; 29 – бункера; 30 – автомат зашивання мішків; 31 – вакуум-апарати другого продукту; 32 – мішалки другого продукту; 33 – центрифуги другого продукту; 34 – резервуар пакоти; I – вапняне молоко; II, III – вода; IV – цукор

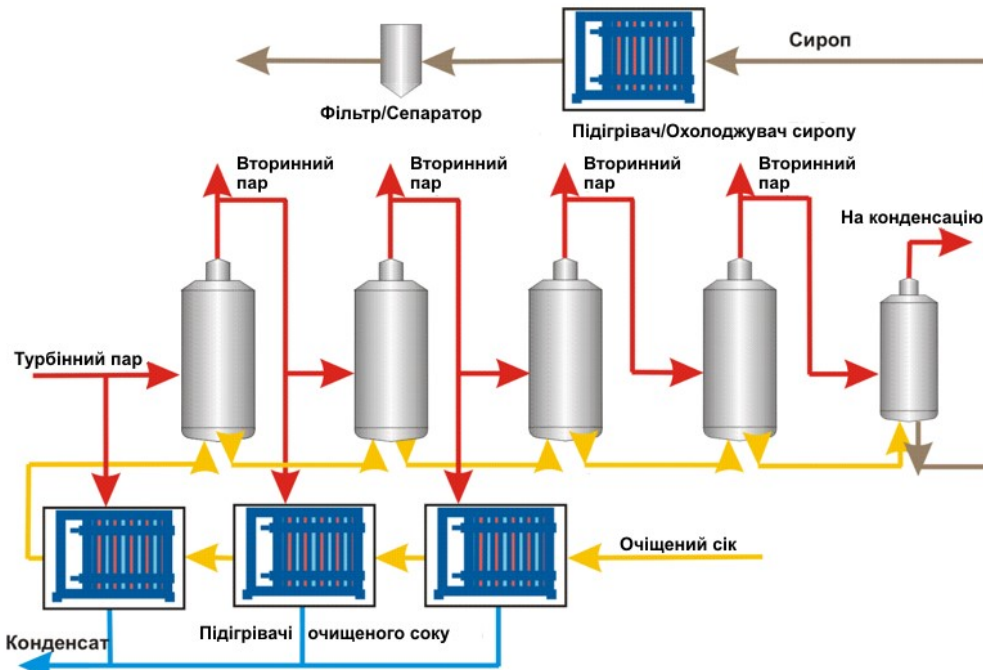


Рис. 2. Приклад схеми випарної станції цукрового заводу, у якій сік перед подачею в перший корпус підігрівається в декількох парових пластинчастих підігрівниках [01, 725].

Для заданих технічних умов дослідники з високою ефективністю використовують, наприклад, звичайні пластинчасті теплообмінні парові апарати. При цьому реалізується основна перевага пластинчастих теплообмінних апаратів, що дозволяє нагріти очищений цукровий сік до температури, на 2°C ближча до температури пари, що неможливо при використанні теплообмінників інших типів. У якості пари для нагрівання, використовують вторинну пару з першого і другого ступенів, а також ретурну (турбінну) пару, якщо це передбачено технічними умовами. Поділ процесу згущення соку випарюванням на два етапи обумовлений тим, що на першому етапі в'язкість соку ще невелика і можна проводити згущення його в багатокорпусних випарних установках, оснащених розвиненою теплообмінною поверхнею.

Аналіз стану питання.

Значна частина публікацій присвячена дослідженню систем виробництва цукру з точки зору Першого закону термодинаміки, а саме на підставі енергетичного балансу.

Такий підхід використовувався, наприклад, в монографії по технологічним аспектам переробки цукру [1, с. 27], в підручнику [2, с. 45].

На енергетичних балансах базуються також роботи по: підвищення енергоефективності та розробки енергозберігаючих технічних рішень виробництва цукру [3, с. 25], оцінці ефективності обладнання, дослідження процесів екстракції в цукровому виробництві [4, с. 750], передпроектної оцінки цукрового заводу [5, с. 166].

Разом з тим, для виявлення незворотності що протікають в системі процесів необхідно залучення не тільки Першого, а й Другого закону термодинаміки, а, отже, використання ексергетичного методу з подальшим виходом на термoeкономічний аналіз.

З найбільш цікавих робіт можна відзначити застосування ексергетичного підходу для: вдосконалення когенераційних систем в цукровій промисловості, дослідження ефективності та впливу на навколишнє середовище системи з виробництва цукру та етанолу [6, с. 597], оптимізації цукрового заводу [7, с. 409], [8, с. 645].

Термoeкономічний аналіз використовувався для дослідження систем випарювання в цукровій промисловості і вдосконалення процесу виробництва цукру на діючих підприємствах, оптимізації спільного вироблення цукру, етанолу та електрики [9, с. 515].

Мета роботи.

Розробка методу оптимізації окремих ступенів випарки цукрового виробництва та його застосування для знаходження оптимальних характеристик першого ступеня.

Метод оптимізації температурних напорів у ступенях випарки.

В енерготехнологічній системі виробництва цукру в цілому найбільші втрати ексергії (майже

72 %) припадають на варіння утфелей тому саме цим процесам приділяється найбільша увага [1, с. 57, 2, с. 1, 10, с. 32].

Для відділення випарки типового цукрового заводу [1, с. 41] був розроблений метод термoeкономічної оптимізації [10, с. 31] (за величиною температурного напору в окремих ступенях).

Задача локальної оптимізації зводиться до мінімізації річних термoeкономічних витрат на систему випарки в цілому:

$$\begin{aligned} Z_{\Sigma}^{opt*} &= \min \sum_{i=1}^m Z_i = \min(Z_{e\Sigma} + Z_{k\Sigma}) = \\ &= \min\left(\sum_{i=1}^m Z_{ei} + \sum_{i=1}^m Z_{ki}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

де Z_{ei} – вартісне вираження річних енергетичних витрат, що розраховуються за відповідними втратами ексергії в i -тому (блоці, ступені) елементі $Z_{ei} = C_e \Pi_i \tau_y$, де C_e – ціна палива, перерахована на один кДж його ексергії; Π_i – втрати ексергії в i -тому елементі, τ_y – час роботи системи за рік; $Z_{ki} = \varphi_y K_i$ – річні капітальні і пов'язані з ними витрати; K_i – капітальні вкладення в i -тий елемент при здачі об'єкта в експлуатацію «під ключ»; φ_y – узагальнений річний коефіцієнт окупності капітальних вкладень.

У подальших розрахунках прийнято: $\tau_y = 3000$ годин на рік, ексергія палива (природний газ з теплою згоряння 36522 МДж/м^3), ціна природного газу $0,354 \text{ USD/м}^3$. При цих умовах $C_e = 9,69 \cdot 10^{-6} \text{ USD/кДж}$. K_i (в USD) розраховувалися за емпіричною формулою [2]

$$K_i = K_1 + \psi A_{si}^{0,87}, \quad (2)$$

де $K_1 = 15000 \text{ USD}$ – вартість монтажу та наладки кожного із ступенів випарки; $\psi = 400 \text{ USD}$ – коефіцієнт вартості теплообмінної поверхні $A, \text{ м}^2$, об'єднаний річний коефіцієнт окупності капітальних вкладень для випарних апаратів $\varphi_y = 0,1908$.

Основна частина втрат ексергії обумовлена теплообміном при кінцевій різниці температур, тому в якості незалежної змінної при термoeкономічній оптимізації була обрана величина температурного напору в кожному із ступенів $\Delta T_i = T_{hi} - T_{ci}$, де T_{hi} – температура гріючої (яка конденсується) пари; T_{ci} – температура технологічного (киплячого) розчину, що гріється $i = 1, 2, \dots, m$, де m – число ступенів.

При цьому кожен із ступенів характеризується своїм мінімальним значенням термoeкономічних (ТЕВ) Z_i^{opt} , що відповідають значенням ΔT_i^{opt} , $i = 1, 2, \dots, m$.

Існування для кожного ступеня свого локального мінімуму Z_i^{opt} пояснюється тим, що зі зростанням ΔT_i збільшується величина Z_{ei} , тому що збільшуються втрати ексергії, і зменшується величина Z_{ki} , оскільки зменшується поверхня теплообміну ступеня, а, отже, їх сума Z_i (1) буде мати мінімум (рис.1).

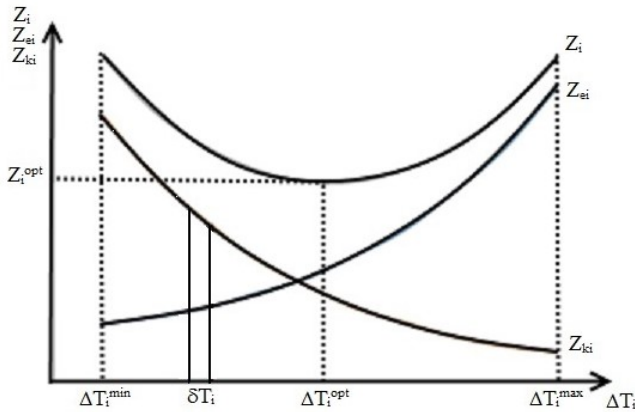


Рис. 1. Залежність ТЕВ в і-тому ступені від величини температурного напору в цьому ступені

Пошук оптимального значення методом Гауса-Зейделя в силу унімодальності функції $Z_i(\Delta T_i)$ проводиться для кожного із ступенів $i = 1, 2, \dots, m$ шляхом послідовного порівняння Z_i , отриманого на даному кроці ітерації, з попереднім, і, якщо знайдено значення менше, то переходять до наступної ітерації.

Розрахунок закінчується в тому випадку, якщо знайдено значення Z_i стає більше, ніж значення Z_{i-1} , що отримане на попередньому кроці, яке і буде оптимальним. Потім розраховуються сумарні ТЕ витрати по (1).

Відповідно, задається інтервал зміни величин температурних напорів $\Delta T_i^{min} \leq \Delta T \leq \Delta T_i^{max}$ і крок зміни цього напору δT_i , $i = 1, 2, \dots, m$.

Для зручності розрахунків можна прийняти $\Delta T_i^{min} = \Delta T^{min}$, $\Delta T_i^{max} = \Delta T^{max}$, $\delta T_i = \delta T$, $i = 1, 2, \dots, m$, тобто як інтервал, так і крок зміни температурного напору для всіх ступенів можуть прийматися однаковими. Значення Z_i^{opt} потім корегується шляхом пошуку з більш дрібним кроком $\delta T_i'$ (рис. 2) поблизу точки ΔT_i^{opt} .

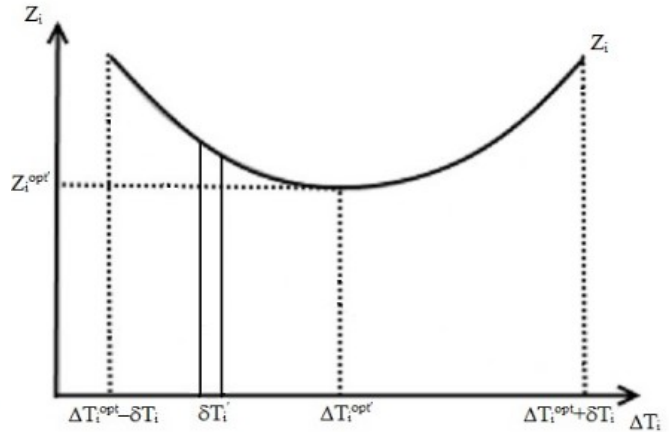


Рис. 2. Уточнене значення оптимального температурного напору в і-той ступені і відповідна йому величина мінімальних ТЕВ.

Розрахунок оптимальних характеристик для першого ступеня випарки.

У розрахунках, виходячи з технологічних обмежень, прийняті: граничні значення температурних напорів $\Delta T_i^{min} = \Delta T^{min} = 4 K$, $\Delta T_i^{max} = \Delta T^{max} = 20 K$ «великий» крок зміни температурного напору $\delta T_i = \delta T = 2 K$; «дрібний» крок зміни температурного напору $\delta T_i' = \delta T' = 0,1 K$.

Отримані значення оптимальних температурних напорів і локальних оптимумів річних термоекономічних витрат для першого ступеня випарки, наведені в табл.1, відкореговані – в табл. 2.

Таблиця 1. Значення температурного напору та річних ТЕВ в першому ступені (оптимальні величини виділені)

Температурний напір, ΔT_1 , К	Температура грійочої пари, T_{h1} , К	Поверхня теплообміну, A_{s1} , м ²	Втрати ексергії, Π_1 , Вт	Вартісне вираження річних ексергетичних витрат, Z_{e1} , USD/year	Річні капітальні та зв'язані з ними витрати, Z_{k1} , USD/year	Річні термоекономічні витрати, Z_1 , USD/year
4	403	4221	221555	23192	111710	134903
6	405	2814	330692	34617	79355	113973
8	407	2110	438756	45929	62418	108348
10	409	1688	545764	57131	51909	109041
12	411	1407	651730	68224	44715	112939
14	413	1206	756669	79209	39462	118672
16	415	1055	860597	90089	35448	125537
18	417	938	963528	100864	32274	133138
20	419	844	1065477	111536	29698	141234

Таблиця 2. Уточнені значення температурного напору та річних ТЕВ в першому ступені (оптимальні величини виділені)

Температурний напір, ΔT_1 , К	Температура гріючої пари, T_{h1} , К	Поверхня теплообміну, A_{s1} , м ²	Втрати ексергії, P_1 , Вт	Вартісне вираження річних ексергетичних витрат, Z_{e1} , USD/year	Річні капітальні та зв'язані з ними витрати, Z_{k1} , USD/year	Річні ТЕВ, Z_1 , USD/year
7,9	406,9	2137	433378	63 073	45 367	108 440
8,0	407,0	2110	438756	62 418	45 929	108 348
8,1	407,1	2084	444132	61 778	46 492	108 270
8,2	407,2	2059	449504	61 152	47 055	108 207
8,3	407,3	2034	454874	60 541	47 617	108 158
8,4	407,4	2010	460242	59 943	48 179	108 122
8,5	407,5	1986	465607	59 358	48 740	108 099
8,6	407,6	1963	470969	58 786	49 302	108 088
8,7	407,7	1941	476328	58 226	49 863	108 090
8,8	407,8	1919	481685	57 679	50 423	108 103
8,9	407,9	1897	487039	57 142	50 984	108 127
9,0	408,0	1876	492391	56 617	51 544	108 162
9,1	408,1	1855	497740	56 103	52 104	108 208
9,2	408,2	1835	503087	55 599	52 664	108 263
9,3	408,3	1815	508430	55 105	53 223	108 329
9,4	408,4	1796	513771	54 622	53 782	108 404
9,5	408,5	1777	519110	54 147	54 341	108 489
9,6	408,6	1759	524446	53 682	54 900	108 582
9,7	408,7	1740	529779	53 226	55 458	108 685
9,8	408,8	1723	535110	52 779	56 016	108 795
9,9	408,9	1705	540438	52 340	56 574	108 914
10,0	409,0	1688	545764	51 909	57 131	109 041

У програмній реалізації саме ці відкориговані значення використовуються в якості Z_i^{opt} . Знайдене значення температурного напору перевищує відповідне у існуючій системі випарки на 2,6 °С.

Підтримання такого збільшеного температурного напору у першому ступені дозволить зменшити річні витрати в цьому ступені на 3800 USD. Слід зазначити, що знайдені значення ΔT_i^{opt} в силу жорсткої прив'язки до технологічного ланцюжка кожного ступеня вимагають взаємного узгодження, тому що потоки, які виходять з попередніх ступенів, одночасно входять в наступні, а, отже, температурний рівень процесів в ступенях повинен узгоджено змінюватися, змінюючи тим самим величину термoeкономічних витрат.

Крім того, зміна параметрів потоків всередині енерготехнологічної системи відділення випарки

викличе також зміну параметрів потоків, які покидають це відділення [13 – 17].

Висновки та перспективи подальшого розвитку.

1. Розроблений метод оптимізації окремих ступенів випарки цукрового виробництва, який можна застосовувати для навчання студентів.

2. В якості цільової функції обрані термoeкономічні витрати, які відповідають вимогам як Першого, так і Другого законів термодинаміки.

3. Знаходження локального оптимума для кожного з ступенів здійснювалось методом Гауса-Зейделя зі змінним кроком зростання температурного напору поблизу точки оптимума.

4. Знайдений оптимум температурного напору у першому ступені (а також і у інших ступенях) є локальним і потребує корегування при оптимізації системи випарювання в цілому.

Список літератури

1. Тovaжнянський Л.Л., Бухкало С.І., Капустенко П.О. та ін. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах. Підручник. К.: ЦНЛ, 2011. 832 с.
2. ДСТУ 4623:2006 «Цукор білий. Технічні умови». К.: ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ 2007. 14 с.
3. Штангеев К.О. Випарні установки та теплові схеми цукрових заводів. Київ: ЮНІДО. 2015. 66 с.
4. Славянский А.А. Промышленное производство сахара: Учебное пособие. М.: МГУТУ имени К.Г. Разумовского. 2015. 255 с.
5. Филоненко В.Н., Цыганков Д.Н., Швецов А.А. Рациональная последовательность энергосберегающих технических решений для сахарного завода. *Saxar*. 2016. № 9. с. 24–31.
6. Schulze T. A look at technological and technical tower extraction trends SUGAR INDUSTRY. *Zuckerindustrie*. 2015. vol. 140. no. 12. p. 748–752.

7. Yousif Karm and Ahmed Rahamatalla. 2014. Previous Study of Elgunied Sugar Factory. R. Deshmukh, A. Jacobson, D. Kammer, Thermal gasification or direct combustion? Comparison of advanced cogeneration systems in the sugarcane industry. Biomass Bioenerg. 2013. vol. 55. p. 163–174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.033>.
8. R. Palacois-Bereche, A. Ensinas, M. Modesto, S.A. Nebra. New alternatives for the fermentation process in the ethanol production from sugarcane: extractive and low temperature fermentation. Energy. 2014. vol. 70. p. 595–604. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.032>.
9. T. Taner, M. Sivrioglu. Data on energy, exergy analysis and optimization for a sugar factory. Data in Brief. 2015. no. 5. p. 408–410. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/dib.
10. Tolga Taner, Mecit Sivrioglu. Energy exergy analysis and optimisation of a model sugar factory in Turkey. Energy. 2015. vol. 93. p. 641–654.
11. R. Palacios-Bereche, A. Ensinas, M. Modesto, S.A. Nebra. Doble-effect distillation and thermal integration applied to the ethanol production process. Energy. 2015. vol. 82. p. 512–523. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.062>
12. Мельник С.И., Никольшин В.Р., Денисова А.Е. Потенциалы энергосбережения в энерготехнологических системах производства сахара. Праці VII Міжн. конф. Муніципальна енергетика: Проблеми, рішення. Миколаїв. 21-22.12.2017. С. 31-33.
13. Бухкало С.И., Гардер С.Е., Химич О.Ю. и др. Применение математического моделирования для комплексных предприятий по переработке отходов. Вісник НТУ «ХПІ». 2012, № 10, с. 74–78.
14. Бухкало С.І. Основні складові комплексних підприємств енергетичного міксу. Вісник НТУ «ХПІ». 2015. № 7 (1116), с. 103–108
15. Бухкало С.І. Загальна технологія харчових виробництв у прикладах і задачах (прикладні та тести з технології крохмалю). 2-ге вид. доп.: ч. 2, [текст] підручник з грифом МОН / С.І. Бухкало – К.: ЦНЛ., 2019. – 108 с.
16. Сирку М.А., Бухкало С.І., Іглін С.П., Мірошніченко Н.М. та ін. Питання комплексного визначення властивостей сировини у межах курсових проєктів. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей ХХVII міжн. н-пр. конф. MicroCAD-2019, 15-17 травня 2019р. Ч. II / за ред. проф. Сокола Є.І. Х.: НТУ «ХПІ». 342 с.
5. Filonenko V.N., Cygankov D.N., Shvecov A.A. Racional'naja posledovatel'nost' jenergosberegajushhij tehniceskij reshenij dlja saharного zavoda [A rational sequence of energy-saving technical solutions for the sugar factory]. Sahar. 2016. no. 9, pp. 24–31.
6. Schulze T. A look at technological and technical tower extraction trends SUGAR INDUSTRY. Zuckerindustrie. 2015. vol. 140. no. 12, pp. 748–752.
7. Yousif Karm and Ahmed Rahamatalla. 2014. Previous Study of Elgunied Sugar Factory. R. Deshmukh, A. Jacobson, D. Kammer, Thermal gasification or direct combustion? Comparison of advanced cogeneration systems in the sugarcane industry. Biomass Bioenerg. 2013. vol. 55, pp. 163–174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.033>
8. R. Palacois-Bereche, A. Ensinas, M. Modesto, S.A. Nebra. New alternatives for the fermentation process in the ethanol production from sugarcane: extractive and low temperature fermentation. Energy. 2014. vol. 70, pp. 595–604. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.032>.
9. T. Taner, M. Sivrioglu, Data on energy, exergy analysis and optimization for a sugar factory. Data in Brief. 2015. no. 5, pp. 408–410. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/dib
10. Tolga Taner, Mecit Sivrioglu. Energy exergy analysis and optimisation of a model sugar factory in Turkey. Energy. 2015. vol. 93. p. 641–654.
11. R. Palacios-Bereche, A. Ensinas, M. Modesto, S.A. Nebra. Doble-effect distillation and thermal integration applied to the ethanol production process. Energy. 2015. vol. 82, pp. 512–523. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.062>.
12. Mel'nik S.I., Nikul'shin V.R., Denisova A.E. Potencialy jenergosberezhenija v jenergotehnologicheskijh sistemah proizvodstva sahara. [Potential of energy saving in energy technology systems of sugar production]. Praci VII Mizhnarod. konf. "Municipal'na energetyka: Problemy, rishennja". [Municipal Energy: Problems, Solutions. Abstracts of the VII Int.Conf. 21-22 December 2017, Mikolaev]. Mykolai'v. 21-22 grudnja 2017, pp. 31–33.
13. Bukhhalo S.I., Garder S.E., Himich O.Ju. i dr. Primenenie matematicheskogo modelirovanija dlja kompleksnyh predpriyatij po pererabotke othodov. Visnik NTU «KhPI». Kh., 2012, No. 10, pp. 74–78.
14. Bukhhalo S.I. Osnovni skladovi kompleksnih pidpriemstv energetichnogo miksu. Visnik NTU «KhPI». 2015. No. 7 (1116), pp. 103–108.
15. Bukhhalo S.I. Zagal'na tehnologija harchovih virobniectv u prikladah i zadachah (prikklady ta testi z tehnologii krohmalju). 2-ge vid. dop.: ch. 2, [tekst] pidruchnik z grifom MON / S.I. Bukhhalo – K.: CNL., 2019. – 108 p.
16. Sirku M.A., Bukhhalo S.I., Iglin S.P., Miroshnichenko N.M. ta in. Pitannja kompleksnogo viznachennja vlastivostej sirovini u mezah kursovih proektiv. Informacijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja: tezi dopovidej HXVII mizhn. n-pr. konf. MicroCAD-2019, 15-17 travnja 2019r. Ch. II / za red. prof. Sokola E.I. Kh.:NTU «KhPI», p. 342.

References (transliterated)

1. Tovazhnjanskij L.L., Bukhhalo S.I., Kapustenko P.O. ta in. Zagal'na tehnologija harchovoї promislivosti u prikladah i zadachah. Pidruchnik. K.: CNL, 2011. 832 p.
2. DSTU 4623:2006 «Cukor bilij. Tehnicni umovi». K. : DERZhSPOZhIVSTANDART UKRAINI 2007. 14 p.
3. Shtangejev K.O. Vuparni ustanovky ta teplovi shemy cukrovyh zavodiv. [Evaporative installations and thermal schemes of sugar factories] K.: JuNIDO Publ. 2015. 66 p.
4. Slavjanskij A.A. Promyshlennoe proizvodstvo sahara: Uchebnoe posobie. [Industrial production of sugar: Tutorial]. Moscow: MGUTU im. K.G. Razumovskogo Publ. 2015.255 p.

Надійшла (received) 19.05.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Нікульшин Володимир Русланович (Нікульшин Владимир Русланович, Nikulshin Volodymyr Ruslanovych) – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Одеська політехніка», завідувач кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики; м. Одеса, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5946-8562>; e-mail: vnikul@paso.net

Денисова Алла Євсївна (Денисова Алла Евсеевна, Denysova Alla Evsiivna) – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Одеська політехніка», директор Українсько-польського інституту; м. Одеса, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3906-3960>; e-mail: alladenysova@gmail.com

Мельник Сергій Ігоревич (Мельник Сергей Игоревич, Melnik Sergey Igorevich) – кандидат технічних наук, Національний університет «Одеська політехніка», старший викладач кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, м. Одеса, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4784-9736>; e-mail: mardaud@i.ua

Височин Віктор Васильович (Высочин Виктор Васильевич, Wysochin Viktor Vasylovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Одеська політехніка», доцент кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, м. Одеса, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2279-203X>; e-mail: vwvin.od@gmail.com

Бухкало Світлана Іванівна (Бухкало Светлана Ивановна, Bukhhalo Svetlana Ivanovna) – кандидат технічних наук, професор кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1389-6921>; e-mail: bis.khr@gmail.com

Андрющенко Анатолій Михайлович (Андрющенко Анатолий Михайлович, Andryushchenko Anatoly Mikhailovich) – Національний університет «Одеська політехніка», старший викладач кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, м. Одеса, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1608-693X>; e-mail: amandr@ukr.net

**V. R. NIKULSHIN, A. E. DENYSOVA, S. I. MELNIK, V. V. WYSOCHIN, S. I. BUKHKALO,
A. M. ANDRYUSHCHENKO.**

METHOD OPTIMIZATION OF SEPARATE SECTIONS IN SUGAR PRODUCTION

A method of thermoeconomic optimization of separate section of a typical sugar plant. was developed. Since the main part of exergy losses is due to heat transfer at the finite temperature difference, the value of temperature drop in each of the section s was chosen as an independent variable in thermoeconomic optimization with the corresponding search for their minimum thermoeconomic costs. The existence of a local minimum for each section is due to the fact that with increasing temperature drop increases the amount of energy costs (because the exergy losses increase) and decreases the amount of capital and related costs (because the heat transfer surface of the section decreases), and, consequently, their sum will have a minimum. The search for this minimum due to the unimodality of the thermoeconomic cost function was performed for each section by the Gauss-Seidel method - by sequentially comparing the costs obtained at this step of the iteration with the previous ones and, if the value is less, move on to the next iteration. If the value found becomes greater than the value obtained in the previous step, which will be optimal. Then the total thermoeconomic costs in the section are calculated. As an example of application of the developed method searching the optimum temperature drop and local optimums of annual thermoeconomic expenses for the first degree were found. The found value of the temperature drop exceeds the corresponding in the existing evaporation system by 2.6 degree and maintaining such an increased temperature drop in the first section allows you to reduce the annual costs in this section at 3800 USD. It should be noted that the found values of temperature drop due to the rigid link to the technological chain of each section require mutual agreement, because the flows coming from the previous sections are simultaneously included in the next, and therefore the temperature level of processes in sections must change, thereby changing the amount of thermoeconomic costs. In addition, it should be taking in amount that a change in the parameters of the flows within the energy technology system of the evaporation system will also cause a change in the parameters of the flows that leave this system.

Keywords: multi-section systems, sugar production, thermoeconomics, optimization

**В. Р. НИКУЛЬШИН, А. Е. ДЕНИСОВА, С. И. МЕЛЬНИК, В. В. ВЫСОЧИН В.В., С. И. БУХКАЛО
А. М. АНДРЮЩЕНКО**

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ СТУПЕНЕЙ ВЫПАРКИ САХАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Для отделения выпарки типового сахарного завода был разработан метод термоэкономической оптимизации отдельных ее ступеней. Поскольку основная часть потерь эксергии обусловлена теплообменом при конечной разности температур, то в качестве независимой переменной при термоэкономической оптимизации была выбрана величина температурного напора в каждом из ступеней с соответствующим поиском своих минимальных термоэкономических затрат. Существование для каждой ступени локального минимума обусловлено тем, что с ростом температурного напора увеличивается величина энергетических затрат (так как увеличиваются потери эксергии) и уменьшается величина капитальных и связанных с ними затрат (так как уменьшается поверхность теплообмена ступени), а, следовательно, их сумма будет иметь минимум. Поиск этого минимума в силу унимодальности функции термоэкономических затрат проводился для каждой из ступеней методом Гаусса-Зейделя – путем последовательного сравнения затрат, полученных на данном этапе итерации с предыдущими и, если найденное значение меньше, то переходили к следующей итерации. Расчет заканчивается в том случае, если найденное значение становится больше, чем значение, полученного на предыдущем шаге, которое и будет оптимальным. Затем рассчитываются суммарные термоэкономические затрат, в ступени. В качестве примера применения разработанного метода были найдены оптимальные температурные напоры и локальные оптимумы годовых термоэкономических затрат для первой ступени. Найденное значение температурного напора превышает соответствующее в существующей системе выпарки на 2,6 градуса и поддержания такого увеличенного температурного напора в первой ступени позволяет уменьшить годовые затраты в этой ступени на 3800 USD. Следует отметить, что найденные значения температурного напора в силу жесткой привязки к технологической цепочке каждой ступени требуют взаимного согласования, так как потоки, исходящие из предыдущих ступеней, одновременно входят в следующие, а, следовательно, температурный уровень процессов в ступенях должен согласованно изменяться, изменяя тем самым величину термоэкономических затрат. Кроме того, следует учитывать, что изменение параметров потоков внутри энерготехнологической системы отделения выпарки вызовет также изменение параметров потоков, которые покидают это отделение.

Ключевые слова: многоступенчатые системы, производство сахара, термоэкономика, оптимизация и вычисления.